

BARTHOLY JUDIT

# Az éghajlat változása – bizonyosságok és bizonytalanságok



*Bartholy Judit  
meteorológus  
az MTA doktora*

Nemcsak a Föld lakóinak száma nő robbanásszerűen, hanem az egy főre jutó felhasznált energia s a légkörbe juttatott szennyezőanyagok mennyisége is. Vajon visszavezethető-e az elmúlt másfél évszázadban zajló kismértékű globális léptékű melegedés az ember mind intenzívebb földi jelenlétére? Okolható-e az egyre növekvő szennyezőanyag-kibocsátás s az így erősödő üvegházhatás az éghajlat változásáért? A szélsőséges időjárási események gyakorisága növekszik, vagy csak gyorsabb és szenzációdesebb a hírközlés globalizálódó világunkban? Lehetséges-e az éghajlat modellezése, előrejelzése? Az előadás bemutat néhány lehetséges globális és regionális éghajlati forgatókönyvet a 21. századra, és áttekinti egy gyors lefolyású éghajlatváltozás esélyét, okait, valamint az előrejelzés bizonytalanságait.

## Globális melegedés: tények

Évtizedeken át sok vita folyt arról, hogy emelkedik-e a légkör felszín közeli hőmérséklete vagy sem. Ha igen, van-e ehhez köze az ember fokozott jelenlétének, a népesség nagyarányú növekedésének, az egyre fokozódó iparoso-

1952-ben született Budapesten. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karán szerzett meteorológus diplomát, diplomamunkájának témája a meteorológiai mezősorok ortogonális sorfejtése volt. 1988-ban a földrajztudomány kandidátusa, 2006-ban akadémiai doktora lett.

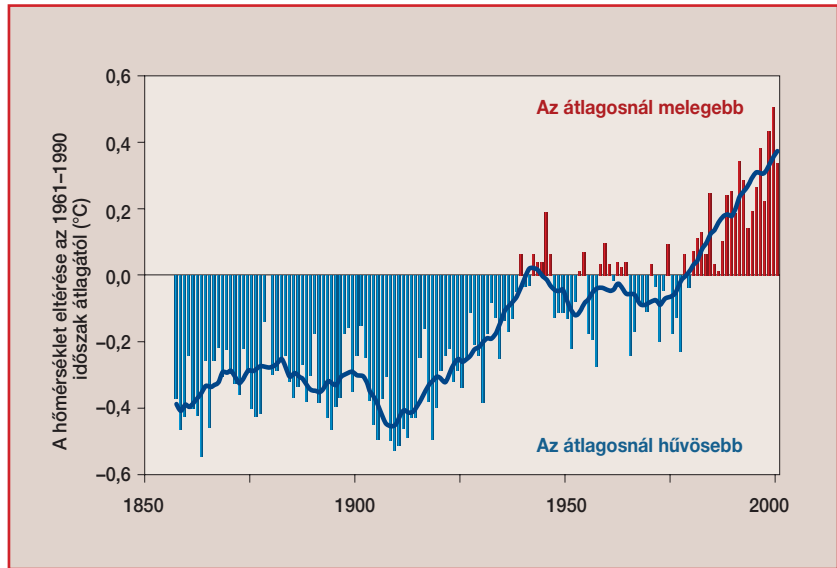
Pályáját az Országos Meteorológiai Szolgálatnál kezdte, a Központi Meteorológiai Intézetben dolgozott 1976-tól 1992-ig, majd az Eötvös Loránd Tudományegyetemen tanított, a Meteorológiai Tanszék vezetője, 2000-től tanszékvezető egyetemi tanára.

Oktatási tevékenysége és kutatási szakterülete a klimatológiához kapcsolódik. Számos hazai és nemzetközi projekt vezetője.

Alapítója és 1990 óta elnöke a Tovább Élni Egyesületnek, mely súlyos, halmozottan sérült gyermekeknek nyújt szolgáltatásokat (lakhatás, terápiás foglalkoztatás).

Főbb kutatási területe: a globális éghajlatváltozás regionális leiskálázása, modellezése, a városok éghajlat-módosító hatása, a megújuló energiaforrások hasznosítási lehetőségei, valamint a szélsőséges éghajlati események.

1. ábra. Az elmúlt 140 év globális átlaghőmérsékletének alakulása



dásnak, s annak, hogy a légkörbe egyre nagyobb mennyiségben jutnak légszennyező anyagok? Az elmúlt száznegyven év átlaghőmérsékletének alakulását tanulmányozva azt tapasztaljuk, hogy a hőmérsékleti **anomáliák** emelkedő trendet mutatnak. Feltűnő a változás az 1961–1990 közötti harmincéves időszak átlagában (1. ábra). A közel másfél évszázados időszak alatt a hőmérsékleti görbe csak az elmúlt évtizedekben emelkedett az átlagérték fölé, ami arra utal, hogy nem egyszerű klímaingadozásról vagy természetes változékonyságról van szó. A szárazföldi és óceáni mérések alapján a Föld felszín közeli léghőmérséklete 0,6–0,8 °C-kal emelkedett az elmúlt másfél évszázadban.

Ez a melegedés sem időben, sem térben nem volt egyenletes a Földön. A 20. században Grönland és a Himalája térségét kivéve mindenütt kismértékű emelkedő trend érvényesült. Az 1976–2000-es időszakban a melegedő tendencia szembetűnően fokozódott.

Ezekkel a változásokkal összhangban vannak azok a megfigyelések, melyek szerint a magashegyi gleccserek visszahúzódnak. A tavaszi hóolvadás időpontja, valamint a folyók és tavak jegének megolvadása világszerte néhány nappal korábbra tevődött. Amerikai és orosz tengeralattjárók megfigyelései alapján az 1970-es évek óta az Északi-sark központi régiójában jelentős mértékben elvékonyodott a jégtakaró. Műholdas mérések szerint a teljes északi-sarki régióban a jégtakaró kiterjedése nyáron 10–15 százalékkal, a globális kontinentális jégtakaró 10 százalékkal csökkent az elmúlt néhány évtizedben.

A légköri cirkuláció áramlásainál is megfigyelhetők változások: a Csendes-óceán vidékén gyengült, esetenként időszakosan széthullott a passzát szélrendszer, valamint mindkét féltekén a 60–70° földrajzi szélességek közelében a téli nyugatias áramlás uralkodóvá vált, megerősödött.

Megfigyelések szerint a mérsékelt övben a vegetációs időszak megnövekedett, a növények virágzása korábbra tolódott, a költöző madarak korábban érkeznek. Számos növényfaj, valamint rovarok, madarak és halak élőhelye magasabb földrajzi szélességekre tolódott el.



A Dome C kutatóállomás az Antarktiszon

Ezek a tények meggyőzőek: úgy tűnik, megindult valamilyen változás. Jó lenne tehát tudni: történtek-e már ehhez mérhető változások korábban is? Ha igen, mi következett utánuk? Vajon van okunk megijedni?

## Klímaváltozások a múltban

Politikusok és környezetvédők általában klímaváltozás alatt az antropogén eredetű globális melegedést értik – míg mi, meteorológusok, a természetes és **antropogén** eredetű **éghajlatváltozások** együttesét. Az éghajlat a földtörténeti korok során, majd – közeledve a jelenhez – az emberiség története során is mind térben, mind időben állandóan változott.

Az elmúlt egy-két évszázad változásairól a meteorológiai mérőhálózatok segítségével pontos információink vannak. De hogyan tudunk következtetni az ezt megelőző időszakok éghajlatára? Számos lehetőség van a rendszeres műszeres méréseket megelőző időszakot jellemző, úgynevezett **proxy adatsorok** összeállítására. Az elmúlt néhány évszázad éghajlatára történeti feljegyzésekből, fák évgyűrűiből következtethetünk. A távolabbi, történelem előtti időszakokról üledékes rétegelemzéssel, koralltelepek szerkezetének tanulmányozásával vagy jégtakaróból vett furatminták vizsgálatával tájékozódhatunk. Fúrt jégmintákat általában magashegységi gleccserekből és a sarkvidéki területek vastag jéggrétegeiből vesznek. A Dome C kutatóállomás munkatársai az Antarktisz jégéből vettek furatmintát. A furatelemzés során az elmúlt idők légköri összetételére a lehullott hópelyhek közé szorult légbuborékok analízisével következtetünk. Az oxigénizotópok koncentrációjából rekonstruálhatók az elmúlt idők hőmérsékleti viszonyai. Egyedül ezek a direkt források állnak rendelkezésünkre, s egyben ezek kínálnak a legjobb idősorokat a légkör összetételéről és az éghajlati paraméterekről. A jégminták még az áramlási viszonyokról is adnak információkat az idefújt por-, tengeri só-, pollen- és vulkanikus hamurészecskék révén. A leghosszabb éghajlati minták az Antarktist borító, több kilométer vastagságú jégpáncélból kerülnek ki. Az eddigi rekordhosszúságú jégfuratminta hossza több mint 3000 méter, 2004 elején kezdték meg európai klimatológusok és geofizikusok részletes elemzését. Becslések szerint e minta alapján az elmúlt 740 ezer év éghajlatáról kapunk majd sok-sok új információt.

Példaként nézzük egy régebbi, de már feldolgozott furat alapján az elmúlt 425 ezer év hőmérsékletének és szén-dioxid-koncentrációjának történetét a Déli-sark közelében lévő Vostok állomás jégmintája alapján. A **pleisztocén** kori eljegesedések során a meleg és hideg fázis közötti hőingás a sarkok közelében nagyobb volt, mint a közepes földrajzi szélességeken. A melegebb időszakok megközelítőleg százezer évenként követték egymást, s a periódusok hőmérsékleti ingása a Déli-sark térségében elérte a 10 °C-ot. A Vostok állomás nevezetes jégfuratmintájának fontos új információja volt, hogy a **glaciálisok/interglaciálisok** során teljesen együtt változott a hőmérséklet, a szén-dioxid- és a metánkoncentráció. Jelenlegi



Antarktiszi jégfuratminta  
740 000 évre visszamenőleg

### Anomália:

eltérés az átlagtól.

### Antropogén klímaváltozás:

az emberi tevékenységek (ipar, mezőgazdaság, energiatermelés, közlekedés stb.) miatt bekövetkező éghajlatváltozás.

### Proxy adatsorok:

a múlt éghajlatát közvetett módon jellemző idősorok, melyeket például a fák évgyűrűinek, a lerakódott üledékrétegeknek, a jégfuratoknak stb. az elemzésével kaphatunk.

### Pleisztocén:

földtörténeti kor, a negyedidőszak jelenkort megelőző kora. Körülbelül 2,5 millió évvel ezelőtt kezdődött és körülbelül tízezer évvel ezelőtt ért véget.

**Glaciális:**

eljegesedési időszak, amikor a pólusok és a magashegységek teteje felől nagyobb kiterjedésű összefüggő jégtakaró alakul ki.

**Interglaciális:**

két eljegesedés közötti időszak.

**Üvegházhatás:**

a Napból beérkező energia a földfelszínre érve elnyelődik, majd a felszín hőmérsékletének megfelelő hullámhossztartományban újra kisugárzódik. Ezt a felszín felől a világűr felé haladó hosszabb hullámhosszú sugárzást a légkör bizonyos részecskéi elnyelik, majd a felszín felé újra kisugározzák. Ezáltal az energia egy része bent marad a földi légkörben.

**Üvegházgáz:**

olyan légköri gázok, amelyek az üvegházhatást kiváltják.

ismereteink szerint az eljegesedési ciklusok a földpálya-elemek periodikus változásainak következtében alakulnak ki, mivel azok befolyásolják a földfelszínre érkező napsugárzás mennyiségét, évszakos eloszlását. Érdekes megfigyelni, hogy míg a besugárzás csökkenése és növekedése értelemsszerűen fokozatosan történik, addig az erre adott légköri válasz (a melegedési és hűlési folyamat) nem szimmetrikus: a hűlés 80–90 ezer évig tart, s a melegedés ennek gyakran még egytizedéig sem. A múltban is volt már példa hihetetlenül gyors melegedésre, s ezek mind pontosabb tanulmányozása talán segíthet megérteni a jelenkori éghajlatváltozások fizikai hátterét.

A legutolsó eljegesedés idején a kontinensek közel egyharmadát gleccserek fedték, melyek lenyúltak egészen New Yorkig. Ez az óriási tömegű jég lecsökkentette az óceánok vízmennyiségét, s így a vízszint több mint száz méterrel alacsonyabb volt a jelenleginél. Ennek következtében egy szárazföldi híd kötötte össze Szibériát Alaszkával, lehetővé téve a kontinensek közötti közlekedést.

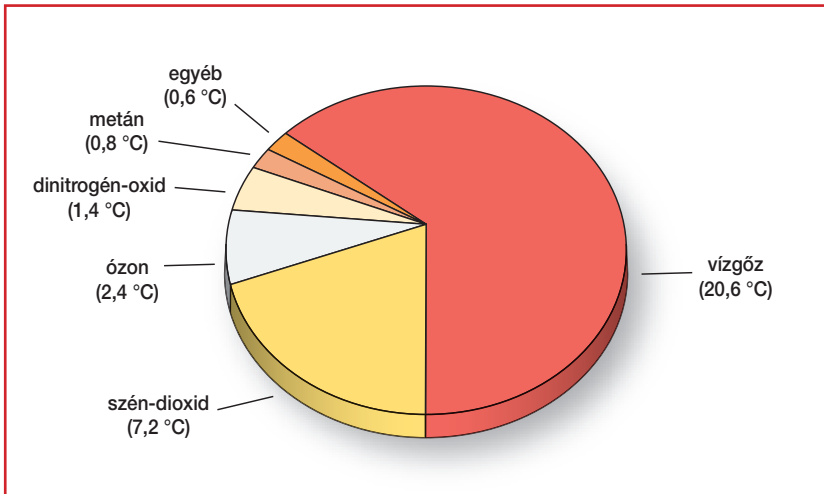
A múltban az eljegesedési időszakok idején a jelenleginél akár 6–8 °C-kal hidegebb klíma uralkodott. Az elmúlt 425 ezer évben a mainál jelentősen melegebb éghajlati viszonyok nem fordultak elő.

## A klímaváltozások természetes és antropogén okai

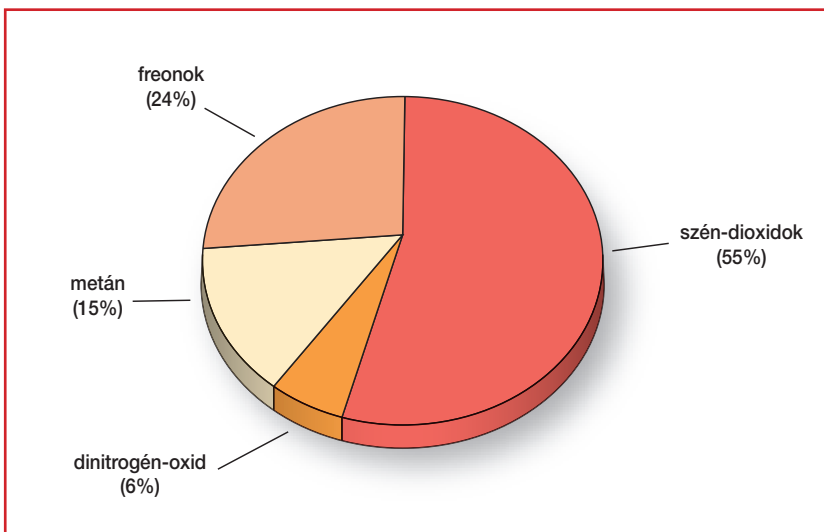
Az éghajlat változásának természetes, illetve az emberi tevékenységből adódó okai is vannak. Mint látni fogjuk, az antropogén eredetű változás esélye nagymértékben növekedett az elmúlt évtizedekben. Vegyük sorra az éghajlat megváltozása irányába ható legfontosabb tényezőket.

### A szén-dioxid és egyéb üvegházhatású gázok koncentrációjának változása

Számos természetes és antropogén eredetű gáz hozzájárul az **üvegházhatáshoz**, melegítik a Föld felszín közeli légrétegeit. E gázok közül a legjelentősebbek a vízgőz, a szén-dioxid, a metán, a dinitrogén-oxid, az ózon és a halogénezett szénhidrogének (freonok) (2. ábra). Ha a földi légkörnek nem lenne természetes üvegházhatása, akkor a felszín közeli légghőmérséklet 33 °C-kal lenne alacsonyabb. A legnagyobb mértékben a vízgőz (20,6 °C) és a szén-dioxid (7,2 °C) járul hozzá a természetes üvegházhatáshoz. Az antropogén eredetű globális melegedésben a legjelentősebb szerep a szén-dioxidnak jut, amely a teljes hatás mintegy 55 százalékáért felelős (3. ábra).



2. ábra. Az üvegházhatású gázok hozzájárulása a 33 °C-os földi átlaghőmérséklet-többlet-hez



3. ábra. Az üvegházhatású gázok hozzájárulása a globális melegedéshez

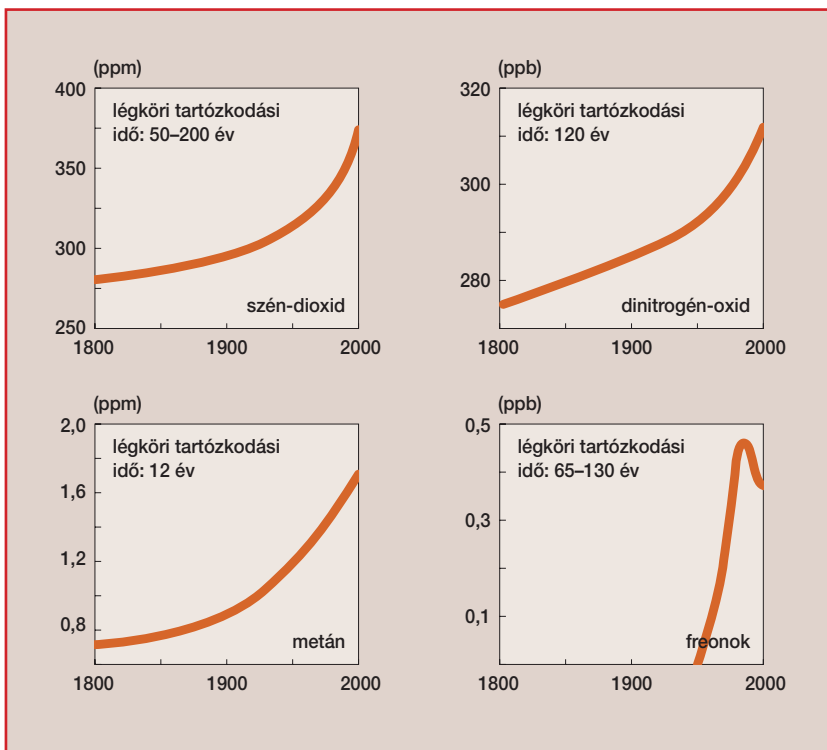
## Az emberi tevékenység és az üvegházgázok

Változott-e kimutatható mértékben az **üvegházgázok** légköri koncentrációja az elmúlt két évszázad során? A válasz egyértelmű igen, a 4. ábrán a szén-dioxid, a metán, a dinitrogén-oxid és a freonok koncentrációváltozásait kísérhetjük figyelemmel az elmúlt kétszáz évben. Mindegyiknél jelentős mértékű, a 20. század második felében pedig gyorsuló növekedést láthatunk. Szembetűnő, hogy freonok természetes állapotban nem voltak jelen a légkörben, kimutatható mennyiségben csak az 1950-es években jelentek meg az ipari tevékenység következtében.

Melyek az antropogén eredetű metán- és szén-dioxid-kibocsátás forrásai? A 5. ábra mutatja, hogy az antropogén eredetű szén-dioxid-kibocsátás közel fele (46 százalék) az erőművek és finomítók révén jut a légkörbe. Az erdők irtása (23 százalék), a cementgyártás (12 százalék), a gázgyártás (9 százalék) szintén jelentős mértékben hozzájárul a légköri szén-dioxid megnövekedett mennyiségéhez. A metánemisszió komponensei között az ipari forrásokon (bányászat, 25 százalék) túl jelentős szerephez jut a mező-



4. ábra. Fontosabb üvegházhatású gázok koncentrációjának változása a légkörben (1800–2000)



#### „parts per” mértékegységek:

kémiai elemek, illetve szennyező anyagok nagyon kis koncentrációját jelölik. A parts per million (ppm), illetve a parts per billion (ppb) jelentése az ábrán: egymillió, illetve egymilliárd molekula között hány darab szén-dioxid vagy dinitrogén-oxid molekula található.

#### El Niño vagy Déli oszcilláció:

a trópusi Csendes-óceán vidékén két-hat éves periódusú éghajlati jelenség, mely az óceán és a légkör kölcsönhatása révén alakul ki. Két szélső állapota az El Niño (meleg) és a La Nina (hideg) fázis. El Niño időszakokban Dél-Amerika partjai mentén a szokásosnál melegebb az óceán vize, míg La Nina idején az átlagostól jóval hűvösebb.

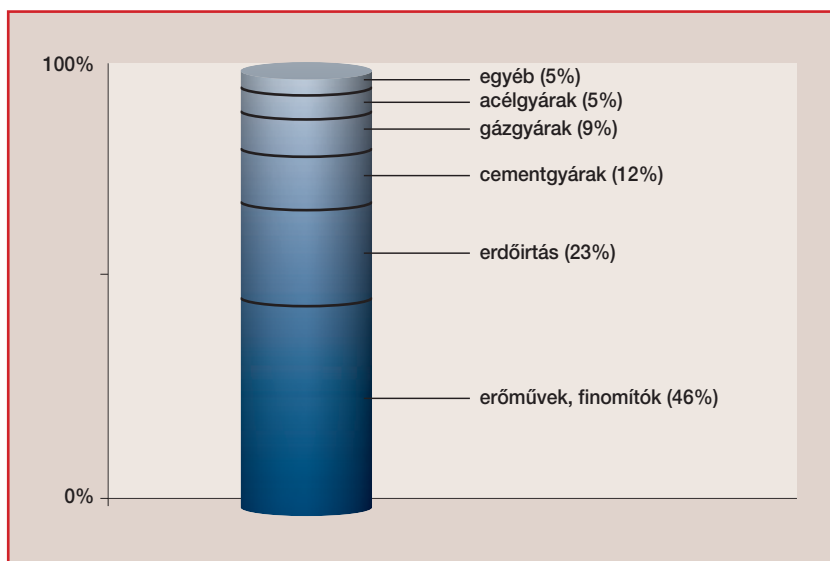
gazdaság (6. ábra). Míg az állattenyésztés 28 százalékkal, addig a rizstermesztés és a szántóföldek feltörése 15 százalékkal, illetve 7 százalékkal növeli a légköri metánkoncentrációt.

## Az óceán cirkulációja

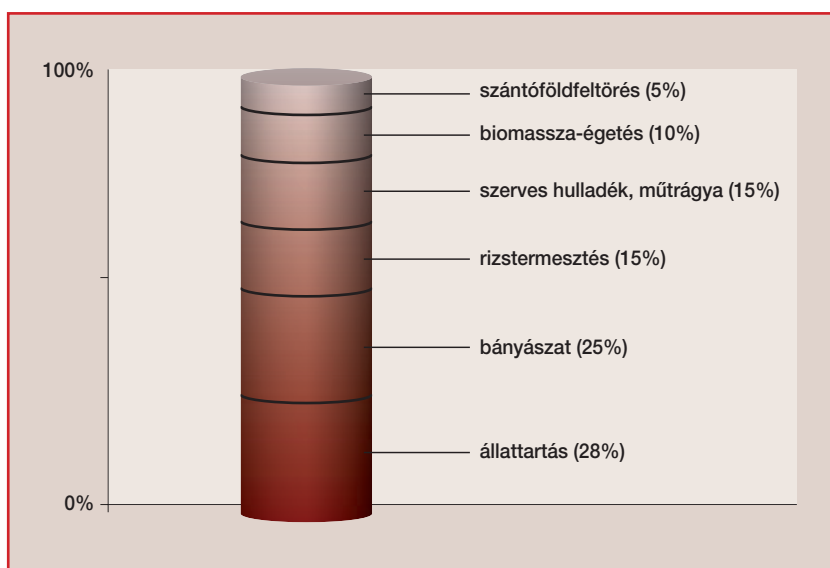
Az óceánok közvetlen hatása az éghajlatra abból származik, hogy a légköri cirkuláció és az óceán áramlásai hőt szállítanak a trópusi zónából a sarkok felé. Ezeket az áramlási rendszereket nagyon sok folyamat befolyásolja és módosítja regionális és globális skálán. Az óceán–légkör kölcsönhatás olyan



Az El Niño hatása



5. ábra. A szén-dioxid antropogén forrásai



6. ábra. A metán antropogén forrásai

jelenségeket is létrehozhat, mint például az **El Niño**, mely két-hat évente újra és újra megjelenik a Csendes-óceán trópusi területein.

Az óceánok az üvegházgázokra is hatást gyakorolnak, fontos szerepük van a légköri szén-dioxid-koncentráció kialakításában. A légköri szén-dioxid és az óceán felszíni vizeiben oldott szén-dioxid között hosszabb időszakot tekintve egyensúly van. Az óceánban lejátszódó cirkulációs, kémiai és biológiai folyamatok az egyensúly kismértékű eltolódása révén a szén-dioxid légköri mennyiségének módosításával az éghajlat lassú változását eredményezhetik.

## Vulkáni tevékenység

Vulkánkitörések alkalmával több ezer km<sup>3</sup> mennyiségű anyag lökődik fel a légkörbe, melynek nagy része néhány napon belül leülepszik vagy esőzések révén kimosódik a légkörből. A kis átmérőjű részecskék (szul-



### Sztratoszféra:

a légkör troposzféra feletti ritkább rétege, ahol a hőmérséklet a magassággal növekszik.

### Albedó:

sugárzás-visszaverő képesség, mely azt mutatja meg, hogy az adott felület a beérkező napsugárzást milyen arányban veri vissza.

### Planetáris albedó:

a Földre vonatkozó átlagos albedó, mely a Napból a teljes földfelszínre érkező összenergia visszaverődési hányadát adja meg.

### Városi hősziget:

a mesterséges burkolatok több energiát nyelnek el, s ezért több energiát adnak át a felettük lévő légréznek is, mint a természetes növényzettel borított területek. A vízszintes és függőleges irányban egyaránt sok mesterséges burkolattal (aszfalt, beton stb.) rendelkező településeken magasabb hőmérsékletek alakulnak ki a környező természetes felszínborítottságú térségekhez viszonyítva.

### Éghajlati visszacsatolási mechanizmus:

az éghajlati rendszer elemei között zajló kölcsönhatások, melyek eredményeképpen egy kiinduló változás felerősödhet vagy gyengülhet. Előbbiek a pozitív, az utóbbiak a negatív visszacsatolások.

fát-aeroszolk) nagyobb, robbanás erejű vulkánkitörések alkalmával feljutnak az alsó **sztratoszférába**, akár 30 kilométeres magasságba is. Ezen a szinten már szinte egyáltalán nincs felhő- és csapadékképződés, így akár egy-két évig is eltarthat, mire ezek a részecskék kikerülnek a légkörből. A vulkánkitörésekből származó részecskéken szóródnak a Napból érkező sugarak, s így megnövelvén a **planetáris albedót** hűtő hatást fejtenek ki. Például az El Chicon és a Pinatubo vulkánok a kitörések évében (1982, illetve 1991) 0,5–0,7 °C-kal csökkentették a globálisan átlagolt felszínhőmérsékletet.

## A Nap sugárzásának és a Föld orbitális paramétereinek megváltozása

Mint ahogy a földi energiakészlet forrása a Nap, így annak sugárzásváltozásai lényeges hatással vannak a földi éghajlatra. Egyes kutatók úgy vélekednek, hogy a 20. század első felének melegekedése részben magyarázható a Nap sugárzási energiájának időszakos növekedésével. A műszeres mérések megkezdése előtti időszakról nagyon nehéz pontos adatokkal szolgálni a Nap sugárzási energiájáról, kutatási eredmények alapján mégis úgy tűnik, hogy az utolsó egymillió évben a Nap kisugárzott energiája csak nagyon kis mértékben változott.

A Föld pályaparamétereinek kicsi és lassú változása is vezethet klimatológiai fontos évszakeltolódásokhoz az évezredek során. Éghajlati visszacsatolások erősíthetik ezeket a kis változásokat, s akár jégkorszakokat is okozhatnak. Ilyen paraméterek például a Nap körüli ellipszispálya lapultsága, a Föld forgástengelyének dőlésszöge, a forgási szögsebesség módosulása.

## A földhasználat megváltozása

Az emberek a Föld felszínét is átalakítják: erdőből például megművelt szántóföld lesz (mely éves ciklussal jelentős felszíni változásokat mutat); vagy természetes felszínből betonnal, aszfalttal, tetőkkel lefedett városi környezet. Ezek a változások módosítják a lokális/regionális éghajlatot például a **városi hősziget**-jelenség kialakulása révén.

## Önerősítő és öngyengítő visszacsatolások

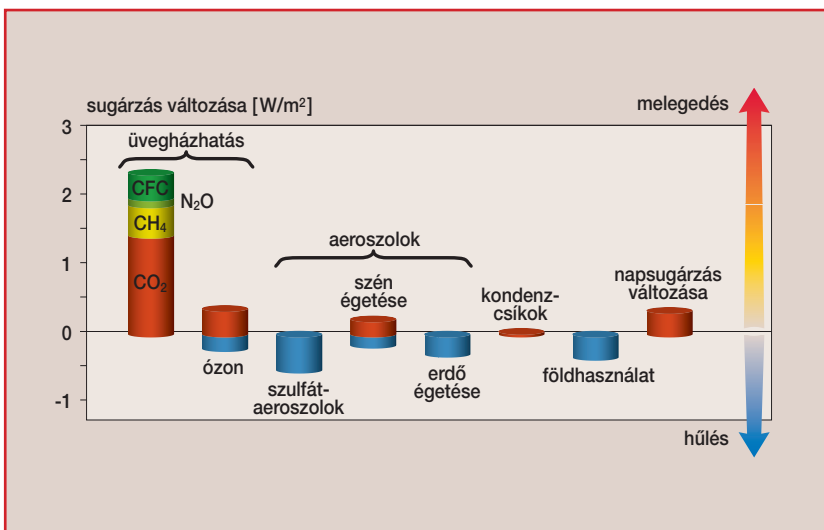
A globális melegekedés folyamatához számos **visszacsatolási mechanizmus** kapcsolható, melyek közül a három legfontosabb a hó–jég–**albedó**, a víz–gőz és a felhő típusú visszacsatolási mechanizmusok. Közülük talán a legismertebb az önerősítő (pozitív) hó–jég–albedó visszacsatolási mechanizmus. Itt a globális melegekedés következtében változik a Föld planetáris albedója. A hó és a jég mennyisége csökken a Földön, így bolygónk a világűr felé kevésbé reflektív, azaz kevesebb energiát ver vissza, viszont ennek következtében a légkör több sugárzási energiát képes elnyelni, s így melegebb





lesz a légkör, amely a hó és jég mennyiségének további csökkenését eredményezi. Ez a körfolyamat a kiinduló melegedő hatást felerősíti, ezért hívjuk önerősítő visszacsatolási mechanizmusnak.

Kis részecskék (úgynevezett **aeroszolok**) légkörbe juttatása melegítő és hűtő hatással egyaránt járhat: a világos színű szulfát-aeroszolok a sugárzás nagyobb mértékű szórása miatt hűtő hatásúak, míg a sötét kormoszemcsék a napsugárzás nagyobb mértékű elnyelése miatt melegítő hatásúak.



7. ábra. A sugárzási hatások megváltozása 1750 és 2000 között

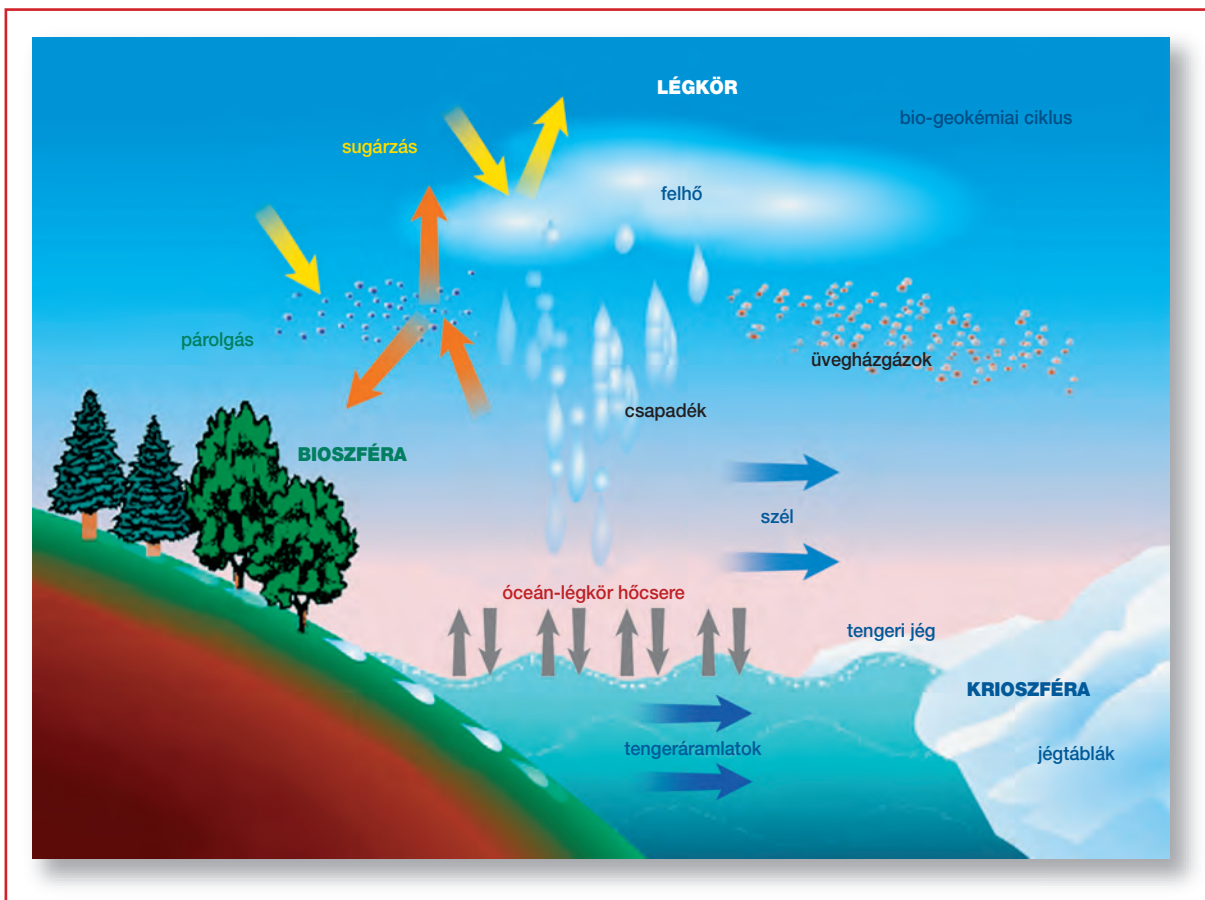
Összefoglalóan elmondhatjuk, hogy az alsó légkörben az elmúlt két-százötven évben bekövetkezett sugárzási viszonyok megváltozásáért számos folyamat felelős, melyeket a 7. ábrán mutatunk be. A legnagyobb hatású, s egyértelműen a globális melegedés irányába mutat ezen összetevők közül az üvegházhatás, pontosabban az üvegházgázok antropogén eredetű koncentrációváltozása. További légkört „melegítő” komponensek: a **troposzférikus** ózonkoncentráció emelkedése, a fosszilis tüzelőanyagok ége-

#### Aeroszol:

a légkörben finoman eloszlott szilárd és cseppfolyós részecskék.

#### Troposféra:

a légkör legalsó rétege, magassága a közepes földrajzi szélességeken mintegy 10–12 kilométer. Lényeges jellemzője, hogy a hőmérséklet általában csökken a magassággal felfelé haladva. Ebben a felszín közeli rétegben zajlanak az időjárási események (csapadékképződés, ciklonok, anticiklonok vándorlása stb.).



8. ábra. Az éghajlati rendszer elemei

téséből származó aeroszolok mennyiségének növekedése, a repülőgépek-ből a légkörbe kerülő égéstermékek hatása, valamint a Nap sugárzásának változásai. A sugárzási kényszer megváltozásához sokkal kisebb mértékben járulnak hozzá a légkört „hűtő” folyamatok: a sztratoszferikus ózonkoncentráció csökkenése, a szulfát-aeroszolok és a szerves anyagok égetéséből származó aeroszolok mennyiségének növekedése, valamint a földhasználatban bekövetkezett változások.

## Jövőkép: az éghajlat modellezése és a modellezés bizonytalanságai

Az eddigiek során láttuk, hogy az elmúlt két évszázadban az üvegházgázok légköri koncentrációja jelentős mértékben növekedett. Ez értelemszerűen együtt jár a légköri sugárzási viszonyok megváltozásával és az üvegházhatás fokozódásával. E folyamatok sokrétű visszacsatolási mechanizmusokat indítanak el, melyek nehezen modellezhető, nehezen prognosztizálható folyamatláncolatokat vonnak maguk után.

Léteznek-e olyan eszközök, melyekkel e korlátok ellenére megbecsülhetjük húsz-ötven-száz évre előre az éghajlat alakulását? Megmondhat-

jük-e egyáltalán, hogy a jövőben tovább melegszik-e éghajlatunk? S ha igen, milyen mértékben?

Az éghajlati rendszer elemei a légkör, az óceán, a talajfelszín, a **krioszféra** (a tengeri és a szárazföldi jég és hó összessége), valamint a bioszféra (8. ábra). A klímamodellek nem kevesebbre vállalkoznak, mint az éghajlati rendszer folyamatainak, kölcsönhatásainak leírására. Az éghajlati modellek jelentik az egyedüli eszközt, mellyel a jövő klímájára vonatkozó becsléseket készíthetünk. Ezek a földi légkört mint fizikai rendszert matematikai formulákkal írják le. Szimulálják a légkör és az óceánok mozgásait, becslést adnak a hőmérséklet, sűrűség, légnyomás várható alakulására. Leírják a **hidrológiai ciklus** elemeit, a sarki jégsapkák, gleccserek terjeszkedését, olvadását. Közelítik a felhő- és csapadékképződési folyamatokat.

A modellek lehetőséget adnak a természetes és antropogén okok hatására bekövetkező globális hőmérséklet-változások külön-külön és együttes szimulálására. A következő ábrák az 1860–2000-es időszakra vonatkozóan mutatják e három modellezés eredményeinek (szürke görbék) a mérési adatokkal (piros görbék) való összehasonlítását. Leolvasható, hogy a modellbecslések nem kielégítő pontosságúak abban az esetben, ha *csak a természetes* okokat (9. ábra) (a Nap sugárzásának változása, vulkáni tevékenység), vagy *csak az antropogén* okokat (10. ábra) (üvegházgázok és szulfát-aeroszlok légköri koncentrációjának változása) vesszük figyelembe. Lényegesen jobb egyezést mutat a mérési idősorokkal a két tényező együttes hatását leíró modellezés (11. ábra), mely igazolja azt a feltevést, hogy a természetes és antropogén hatások egyike sem elhanyagolható a jövőt szimuláló klímamodellekben.

## Az éghajlati forgatókönyvek

Miért beszélünk éghajlati forgatókönyvekről előrejelzések helyett? Ahhoz, hogy a modellek bemenő paramétereiként ötven–száz évre előre megadhassuk az üvegházgázok **emisszió**jának, illetve koncentrációjának értékeit, ismernünk kellene a gazdasági és társadalmi folyamatok jövőbeni alakulását (mint például a népesség változása, a globalizációs folyamat térhódítása és sebessége, a megújuló energiahordozók, illetve a környezetkímélő technológiák elterjedése, a globális és regionális gazdaságpolitika iránya, a nemzetgazdaságok regionális fejlődési tendenciái, területi és elemenkénti emisszióértékek stb.). Ám ezeket a folyamatokat ilyen nagy időtávra előre nem ismerhetjük. Ezért csak éghajlati forgatókönyvekben, úgynevezett klímaszcenáriókban gondolkodhatunk, azaz „ha..., akkor...” jellegű folyamatokban.

Az éghajlatkutató közösség éghajlati helyzetértékelését tartalmazó, öt-hat évenként megjelenő úgynevezett **IPCC**-jelentés négy **alapszcenárió**ját szemlélteti a következő táblázat. Láthatjuk, hogy a négy forgatókönyv eltér egymástól. Az A1, B1 és A2, B2 szcenáriópárok a globalizációs folyamatok felgyorsulása, illetve a régiónkénti fejlődés alapján prognosztizálják a jövőt.

### Krioszféra:

a Földön található hó és jég összessége.

### Hidrológiai ciklus:

a víz földi körforgása, legfontosabb elemei: csapadék, párolgás, lefolyás, beszívargás.

### Emisszió:

kibocsátás, melynek során a kibocsátott anyag légköri mennyisége nő.

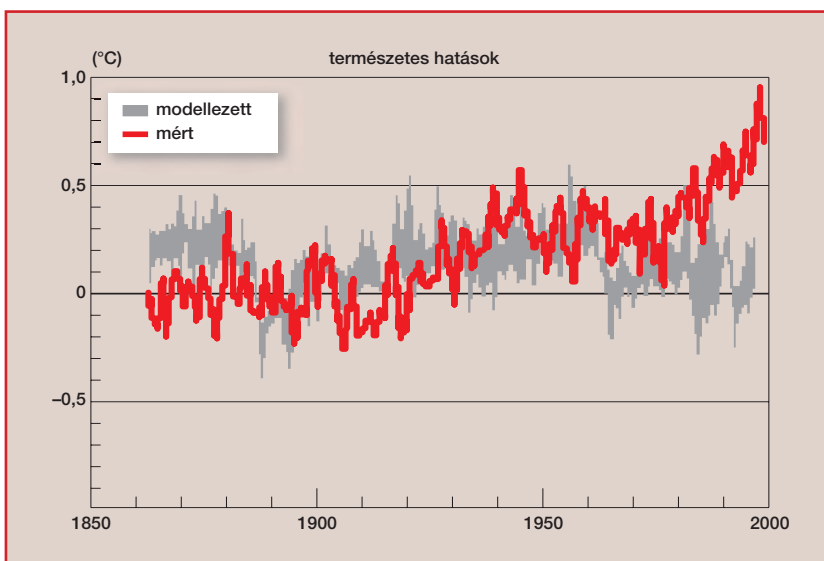
### IPCC:

Intergovernmental Panel on Climate Change (Éghajlatváltozási Kormányközi Testület), az ENSZ keretein belül 1988 óta működő nemzetközi szervezet. A munkában részt vevő tudósok, kutatók feladata, hogy (1) értékeljék és rendszerezék a feltételezett éghajlatváltozás kiváltó okairól és jellegzetességeiről rendelkezésre álló tudományos ismereteket, (2) elemezzék az éghajlatváltozás környezeti és társadalmi-gazdasági következményeit, (3) áttekintsék és értékeljék a szükséges és lehetséges válaszstratégiákat. Az IPCC öt-hat évente készíti el helyzetértékelő jelentését, a legutóbbit (mely a harmadik volt) 2001-ben adta ki.

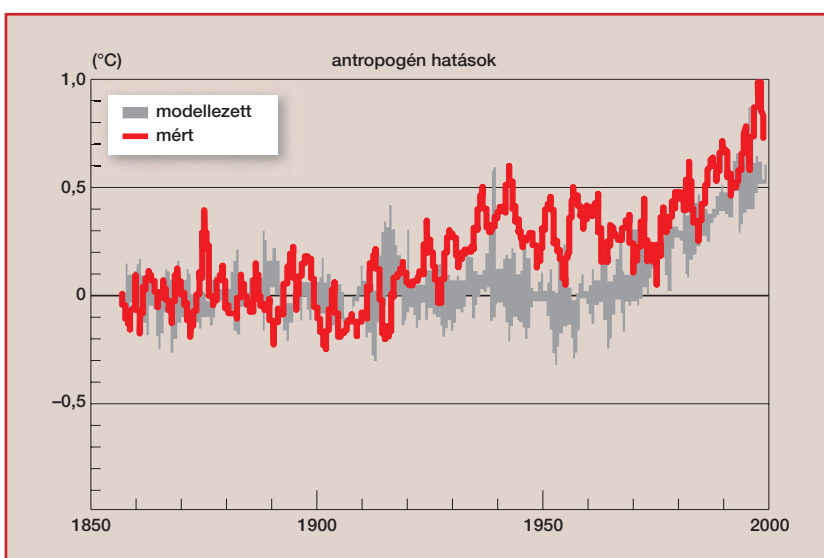
### Szcenárió:

forgatókönyv, mely megadja valamilyen tényező (például a gazdasági fejlődés, a népességszám vagy a szén-dioxid-kibocsátás) jövőbeli várható alakulását.

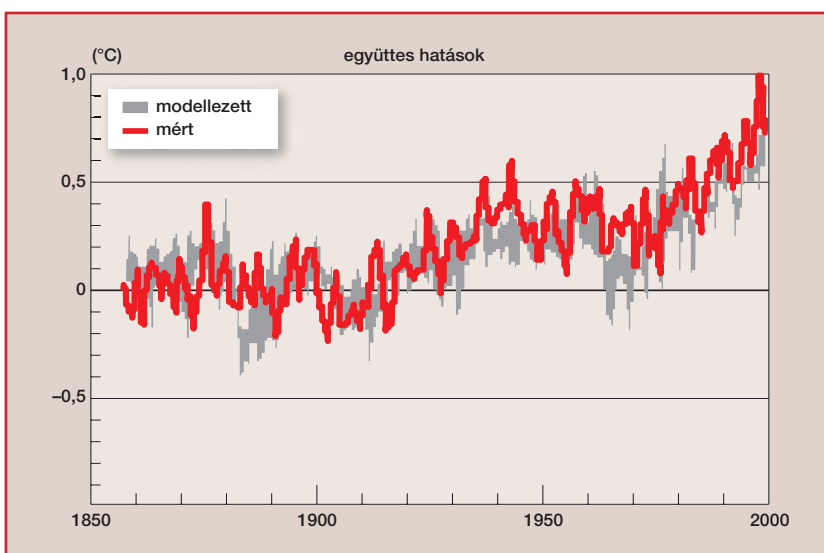
9. ábra. A modellezett és mért  
hőmérséklet-változások  
összehasonlítása (1860–2000);  
természetes hatások



10. ábra. A modellezett és mért  
hőmérséklet-változások  
összehasonlítása (1860–2000);  
antropogén hatások



11. ábra. A modellezett és mért  
hőmérséklet-változások  
összehasonlítása (1860–2000);  
együttes hatások



Az A1, A2 scenáriók esetén a gyors gazdasági fejlődésé, míg a B1, B2 esetben a környezettudatos technológiai fejlesztéseké a prioritás. Ezek tükrében az emissziók (s egyben a klímaváltozás mértéke) szempontjából az A1 a legoptimistább és a B2 a legpesszimistább forgatókönyv.

<p><b>A1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>► <i>nagyon gyors gazdasági növekedés;</i></li> <li>► a népesség növekedése a 21. század közepéig, utána csökkenés;</li> <li>► új és <i>hatékony technológiák</i> gyors megjelenése, elterjedése;</li> <li>► az egyes régiók közötti <i>kiegyenlítődé</i>s;</li> <li>► fokozott kulturális és társadalmi impulzusok;</li> <li>► a regionális jövedelemkülönbségek csökkenése.</li> </ul>	<p><b>A2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>► <i>heterogén</i> fejlődési séma;</li> <li>► a helyi önkormányzatok, önszerveződések hangsúlyosabb működése;</li> <li>► <i>folyamatosan növekvő népesség</i>;</li> <li>► divergens regionális gazdasági fejlődés;</li> <li>► <i>lassú</i> és területileg nem egyenletes <i>technológiai fejlődés</i>.</li> </ul>
<p><b>B1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>► <i>kiegyenlítődő</i> gazdasági fejlődés;</li> <li>► az A1-hez hasonló népességváltozások;</li> <li>► a gazdasági szerkezet <i>gyors</i> eltolódása a szolgáltatási és információs ágazatok felé;</li> <li>► <i>környezetbarát és energiahatékony technológiák</i> bevezetése;</li> <li>► a gazdasági, társadalmi és környezeti problémákra <i>globális megoldások</i> kidolgozása.</li> </ul>	<p><b>B2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>► a gazdasági, társadalmi és környezeti problémák <i>lokális szintű</i> kezelése;</li> <li>► <i>folyamatosan növekvő globális népességváltozás</i>;</li> <li>► közepes mértékű gazdasági fejlődés;</li> <li>► az A1-hez és a B1-hez képest lassabb és sokoldalúbb fejlődés.</li> </ul>

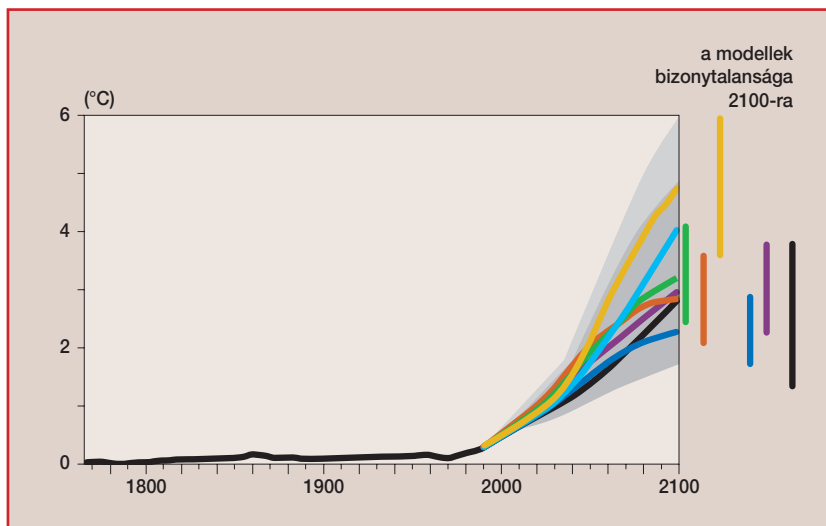
A fenti négy alapszenárión belül 19 kiinduló forgatókönyv áll rendelkezésre, melyek a gazdaság leendő állapotát, a szennyezőanyag-kibocsátás globális mértékét és összetételét írják le. A nyolc éghajlati világgözpontban közel húsz, hatalmas számítógépes kapacitást igénylő globális modell képes becslülni a jövőbeni klíma alakulását. Ezek a globális éghajlati modellek általában 2050-ig, illetve 2100-ig becsülik meg az éghajlati paraméterek globálisan várható alakulását. Tesztfuttatások igazolják, hogy ha a scenáriók alapadatait kellő pontossággal meg tudnánk adni, akkor a modellek képesek lennének a jövő klímáját többé-kevésbé jól leírni.

A 12. ábra közli a mérési adatok alapján számított globális átlaghőmérsékletek megváltozását az elmúlt több mint két évszázadra (1770–1991), valamint bemutatja a 21. századra vonatkozó modellbecsléseket. A különböző scenáriók és modellek eredményeit más-más szín jelöli. A becslések bizonytalanságát a jobb oldalon jelzett intervallumok mutatják. A modellek szerint a földi átlaghőmérséklet 2100-ra előreláthatóan 1,4–5,8 °C-kal növekedne. Az éghajlati rendszer bonyolultsága miatt ugyanakkor a bizonytalanság elég nagy.

A továbbiakban bemutatjuk néhány szimuláció eredményét, mindig ügyelve arra, hogy vagy nagyszámú modell kiértékelte (simított) eredményeit, vagy egy nem szélsőséges scenárió becslését adjuk közre.



12. ábra. A globális átlaghőmérséklet változása 1770-től és a várható menet a 21. században

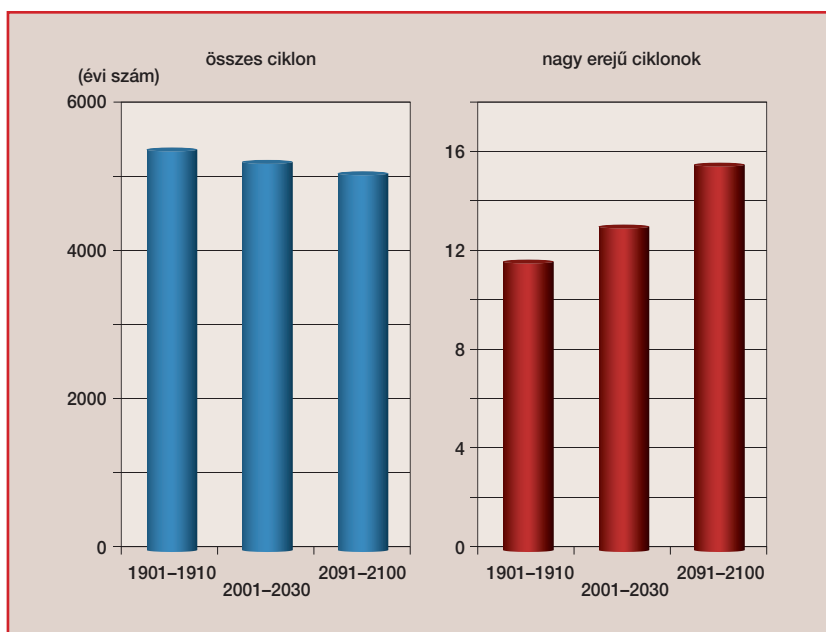


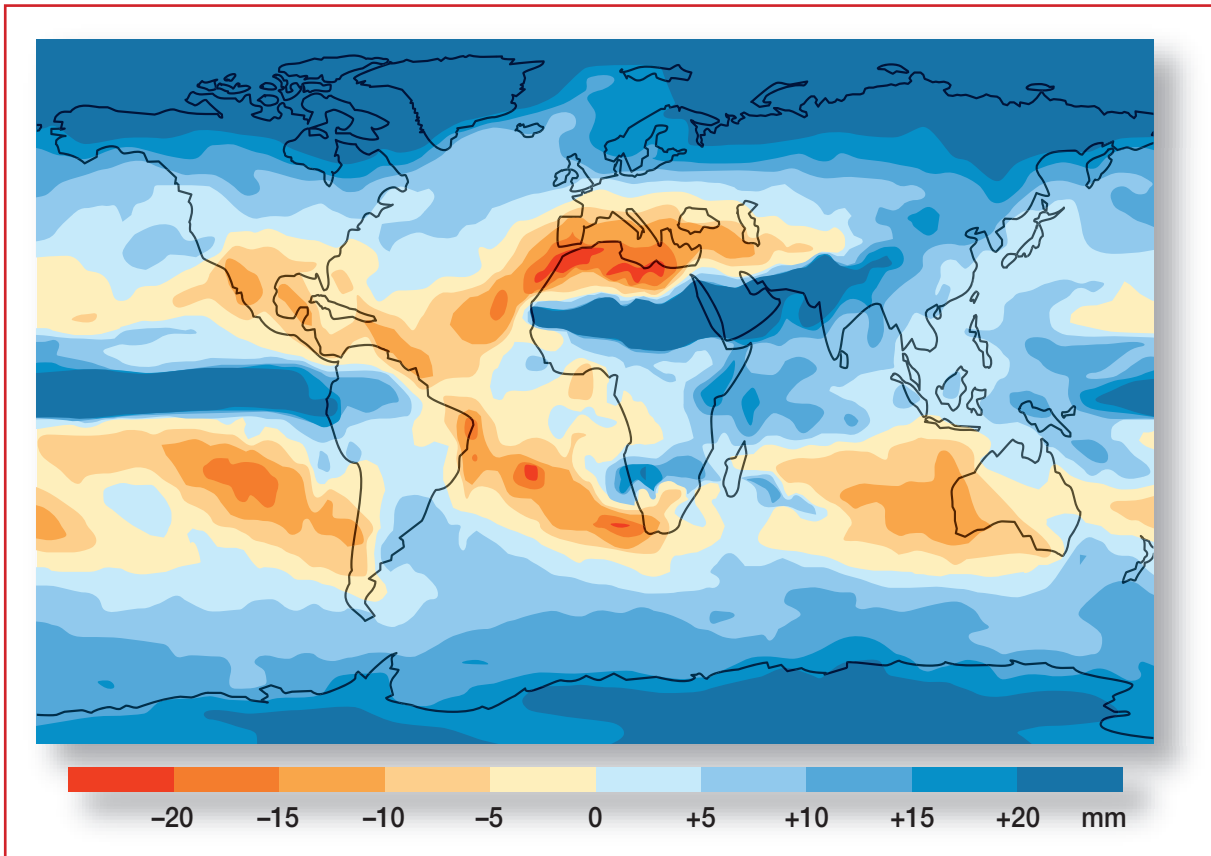
Az átlaghőmérsékletek szimulált megváltozásának százti éves elemzése azt mutatja, hogy a melegedés mértéke a Föld felszínén nem egyenletes, különösen nagy a magas földrajzi szélességeken, s szinte nincs változás az Észak-Atlantikum térségében.

G. A. McBean és Francis W. Zwiers kanadai tudósok legújabb (2003) modelleredményei alapján az északi félgömbön a század végére a légköri cirkuláció jelentős mértékű átrendeződése várható. Az összes ciklon száma lecsökken, míg ezzel egy időben jelentősen emelkedik a nagy erejű ciklonok évi száma (13. ábra).

A hőmérséklet megváltozásához hasonló egyenetlen területi eloszlást kapunk, ha a globális éves csapadékmennyiségek 2100-ra modellezett értékeit elemezzük (14. ábra). Az éves csapadékösszeg általánosan nő a Földön a 21. században. A növekedés a magasabb földrajzi szélességeken és az Egyenlítő körzetében a legintenzívebb. A mérsékelt övi zónában régióként kisebb

13. ábra. A mérsékelt övi ciklon-  
gyakoriságok változása az északi  
féltekén (1901–2100).  
G. A. McBean nyomán, 2003





csökkenést találunk. Az egész Földön a legnagyobb mértékű csapadékcsökkenés a Földközi-tenger körzetében várható, mely területhez a térkép szerint még a Kárpát-medence is hozzátartozik.

14. ábra. A globális éves csapadék megváltozása 2100-ra (referenciaidőszak: 1961–1990)

## Regionális modellek

Ezeket az eredményeket nem tudjuk közvetlenül Magyarország területére értelmezni, mivel e modellek „felbontása” általában nem kisebb 250 kilométernél. Ez azt jelenti, hogy az egész országra két-három rácspont esik. Ebből pontos információkat nem kaphatunk, ezért regionalizációs eljárások alkalmazására van szükség. A globális modellek eredményeit felhasználó, úgynevezett beágyazott modellek képesek a nagy skálájú változásokat területileg finomabb rácstra lebontani. A regionális modellek felbontása 20–40 kilométer is lehet, mely már kisebb régiók pontos leírását is lehetővé teszi. A hamburgi Max Planck Intézetben és az angliai Hadley Központban kifejlesztett modellek alkalmasak lehetnek a Kárpát-medence 21. század végére várható éghajlatának becslésére.

Már megindultak a hazai kísérletek a beágyazott leskalázó modellekkel az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén és az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. Eddigi vizsgálataink alapján a Sió–Balaton vízgyűjtő területe, illetve az Alföld a leginkább veszélyeztetett a klímaváltozások szempontjából. Nem a nagymértékű változás, inkább a szélsőségesebbé váló éghajlat fenyeget elsősorban: a sekély vizű Balaton víz-



*Kiszáradáskor jellegzetesen repedezett talaj a Hortobágyon*

háztartási egyensúlya könnyen felborul, és ekkor a vízszint jelentősen csökkenhet. Az Alföld vízellátottsága eddig is az alsó határon volt. Ha itt még további eltolódás következik be a félszáraz, mediterrán jellegű klíma irányába, akkor a mezőgazdaság nagyon komoly problémákkal kerülhet szembe.

## Korlátok, bizonytalanságok

Ahogy már említettem, a világ nyolc legnagyobb nemzeti kutatóközpontjában közel húsz globális éghajlati modell képes megközelítőleg jó fizikai közelítést adni a légköri és az óceáni folyamatokra különböző jövőbeli emissziós scenáriókból kiindulva. Értelemszerűen ezen modellek csak hipotetikus éghajlatokat jelezhetnek előre. Éghajlati kísérleti laboratóriumok nem létezhetnek, így az eredmények kontrollálására sincs lehetőség. További probléma, hogy a modellekben rejlő bizonytalanságok nehezen számszerűsíthetők. Alább felsorolunk néhány tényezőt, melyek növelik e modellek pontatlanságát, s melyek óvatosságra intenek az eredmények közvetlen és feltétel nélküli interpretálásával kapcsolatban:

- minden modell egyszerűsítés, csak a valóság egy részét írja le;
- a modellek térbeli felbontása nem elegendő;
- a domborzati adatok nem adják meg a felszínt elég pontosan;
- a mérési adataink térben nem adnak elég sűrű lefedettséget;
- sem a modell határfeltételei, sem a bemenő paraméterei nem adhatók meg pontosan.

## Extrém események



*A tornádófelhőből lenyúló, szivattyúként működő szélörvény*

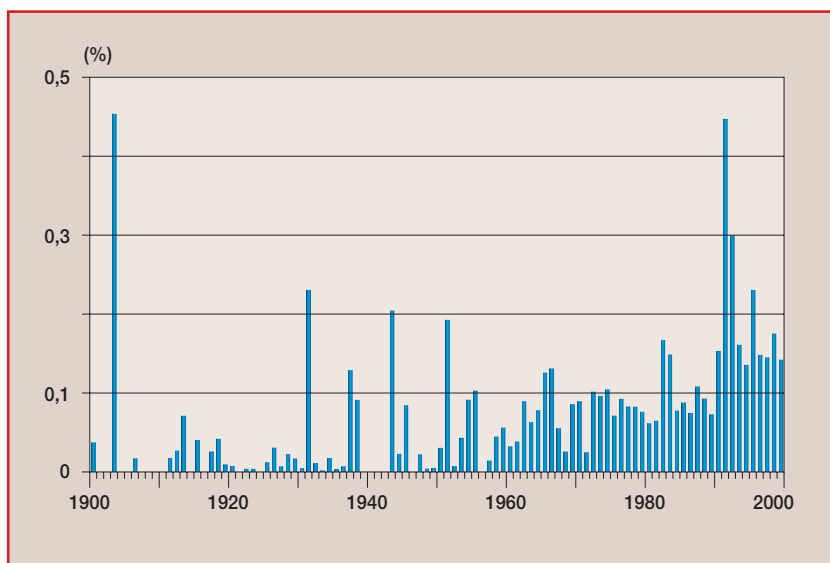
Gyakoribbá válnak-e a globális melegedéssel a szélsőséges éghajlati események?

A globális melegedés folyamata elméletileg három séma szerint történhet:

1. Az átlaghőmérséklet eltolódásával a szokásosnál melegebb időszakok gyakorisága megnövekedik, míg a hűvösebb időszakok aránya csökken.
2. A változékonyság nő, az átlagérték nem változik. Ekkor szimmetrikusan mind a meleg/hideg időszakok, mind a rekordmelegek/rekordhidegek gyakorisága növekszik.
3. A hőmérsékleti átlagértékek és változékonyságok együttes növekedése esetén jelentős mértékben nő a meleg, illetve rekordmeleg időszakok gyakorisága, míg a hideg eseményeké arányosan lecsökken.

Vajon a fenti sémák közül melyik jellemzi a 20–21. századi klímaváltozásokat?

Szinte minden héten hallunk a rádióban, televízióban óriási árvizekről, földcsuszamlásokról vagy nagy erejű tornádók, illetve hurrikánok pusztítá-



15. ábra. Éghajlati katasztrófák okozta károk a világ bruttó nemzeti termékéhez viszonyítva

sairól. Úgy tűnik, mintha gyakoribbak lennének a szélsőséges éghajlati események, az úgynevezett klímakatasztrófák, mint korábban. Az éghajlati katasztrófák okozta károk egyértelmű növekedése figyelhető meg a 20. század során (15. ábra).

Vajon csak látszat ez a növekedés, vagy van valóságalapja? Esetleg csak annak a következménye, hogy egyre sűrűbben lakott a Föld, s egyre drágábbak a klímakatasztrófák során megsemmisült ingatlanok és más vagyontárgyak? Ezeknek a kérdéseknek a megválaszolásához objektíven mérhető mutatókra van szükség.

Ha az átlaghőmérsékletek eltolódása hatással van az emberi társadalmakra és a különböző ökoszisztémákra, akkor az extrémértékek megváltozásának értelemszerűen akár hatványozott következményei is lehetnek ezekre a rendszerekre. Ennek jegyében szerte a világon számos nagyobb térségre vonatkozó klíma-extrém vizsgálat indult, melyek széles körű nemzetközi összefogáshoz vezettek. 1997. június 3–6. között került sor az amerikai Észak-Karolina állambeli Asheville-ben az *Éghajlati extrémumok indexei és indikátorai* című munkakonferenciára, melynek fő céljai között szerepelt annak meghatározása, hogy milyen egységes adatbázis és milyen extrém-indexek lennének a legalkalmasabbak az éghajlati szélsőségek változékonyságának vagy esetleges nagy térségű tendenciáinak vizsgálatára.

Az elemzésekhez 15 hőmérsékleti és 12 csapadékindexet definiáltak, melyeket napi maximum-, minimum- és közép-hőmérsékleti, valamint napi csapadékösszegek idősorainak segítségével határozhatunk meg. A globális és európai vizsgálatainkhoz 350, illetve 140 állomás adatait, míg a Kárpát-medence extrém csapadék- és hőmérsékleti analíziséhez 21 hazai és 10 külföldi állomás idősorait használtuk fel. A 20. század extrém tendenciáinak összehasonlító elemzéséből egy-két példát mutatunk be.

A több mint húsz extrémindex jelentős hányada vagy valamilyen küszöbérték túllépésének a gyakoriságát, vagy valamilyen szint feletti tartózkodás időtartamát elemzi. Az előbbire példák a **fagyos napok** évi száma, a **nyári napok** évi száma, a **hőségnapok** évi száma, a 20 millimétert megha-

#### Fagyos napok:

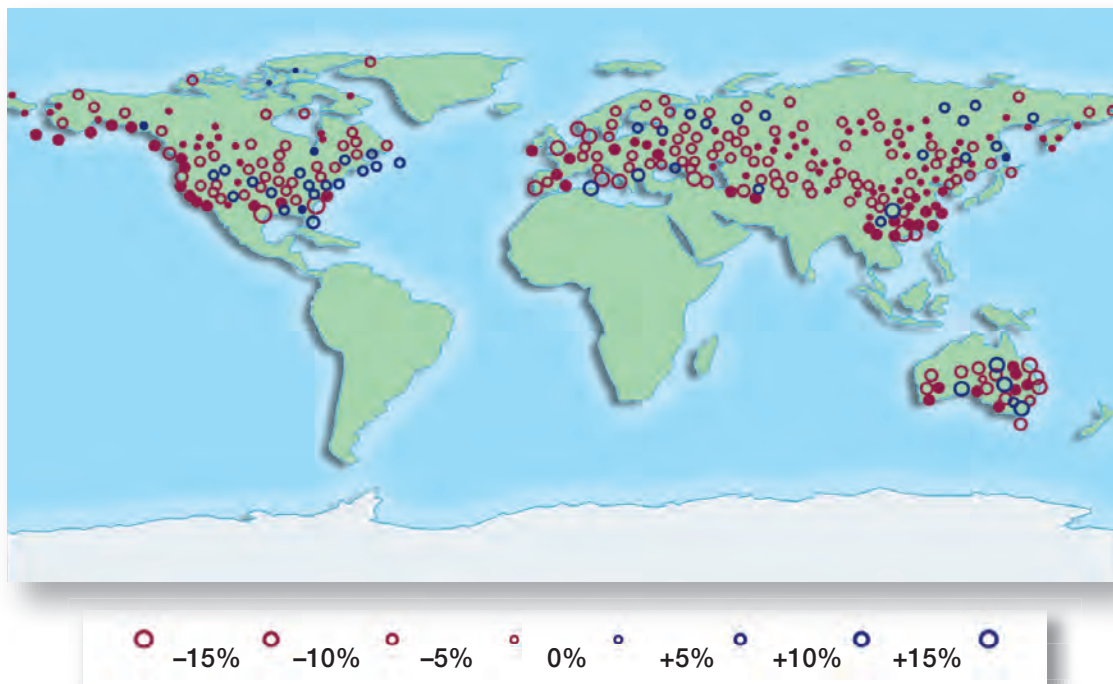
azok a napok, amikor a napi minimum-hőmérséklet fagypont alá süllyed.

#### Nyári napok:

azok a napok, amikor a napi maximum-hőmérséklet meghaladja a 25 °C-ot.

#### Hőségnapok:

azok a napok, amikor a napi maximum-hőmérséklet eléri a 30 °C-ot.



16. ábra. A fagyos napok számának ( $T_{min} < 0\text{ °C}$ ) megváltozása 1950–2000 között

#### Hőhullám:

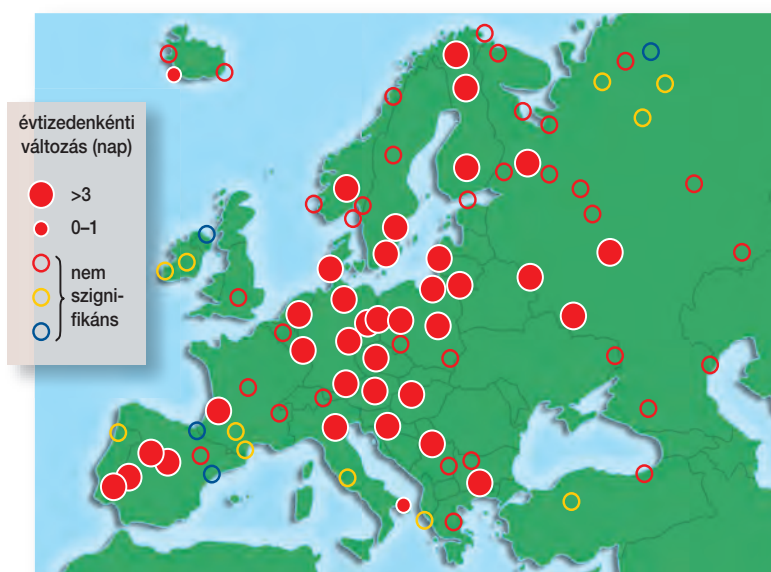
az a legalább öt napig tartó időszak, amikor az egymást követő napokon a napi maximum-hőmérséklet eléri az 1961–1990-es normálidőszak átlagos napi maximum-hőmérsékletét.

#### Vegetációs periódus:

kezdetét akkortól számítjuk, amikor legalább hat napon át a napi középhőmérséklet meghaladja az  $5\text{ °C}$ -ot, s akkor van vége, amikor legalább hat napon át a napi középhőmérséklet nem éri el az  $5\text{ °C}$ -ot.

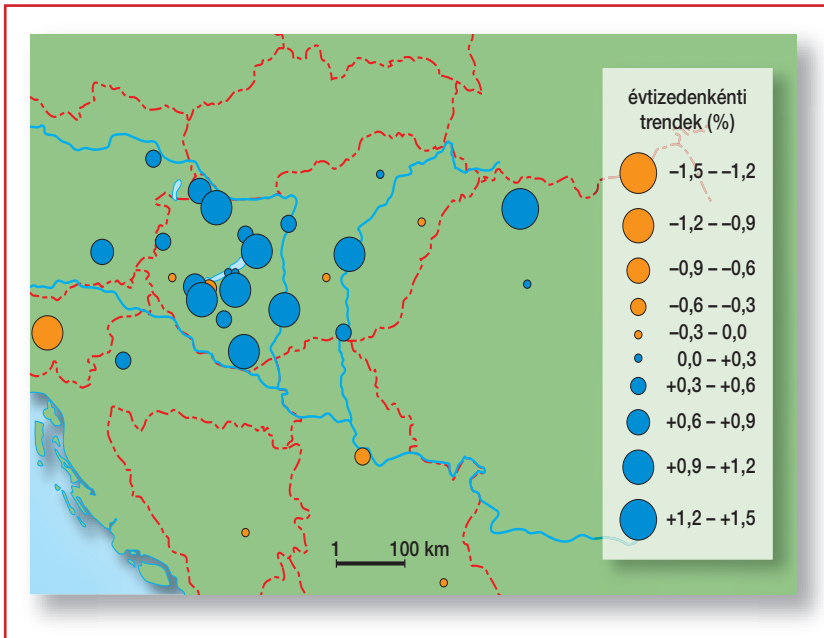
ladó csapadékú napok évi száma stb. Az utóbbiakra pedig a **hőhullámok** évi összhossza, a **vegetációs periódus** évi hossza, a **száraz időszakok** évi összhossza stb.

A hőmérsékleti extrém paraméterek mind földi, mind európai, mind Kárpát-medencei térszálán egyöntetű melegedő tendenciát mutatnak a teljes 20. századra vonatkozóan, ami például földi skálán a fagyos napok számának csökkenését (16. ábra), az európai térségben pedig a hőhullámok hosszának növekedését (17. ábra) jelenti.



17. ábra. A hőhullámok hosszának megváltozása (1976–1999). ECA & D, 2002

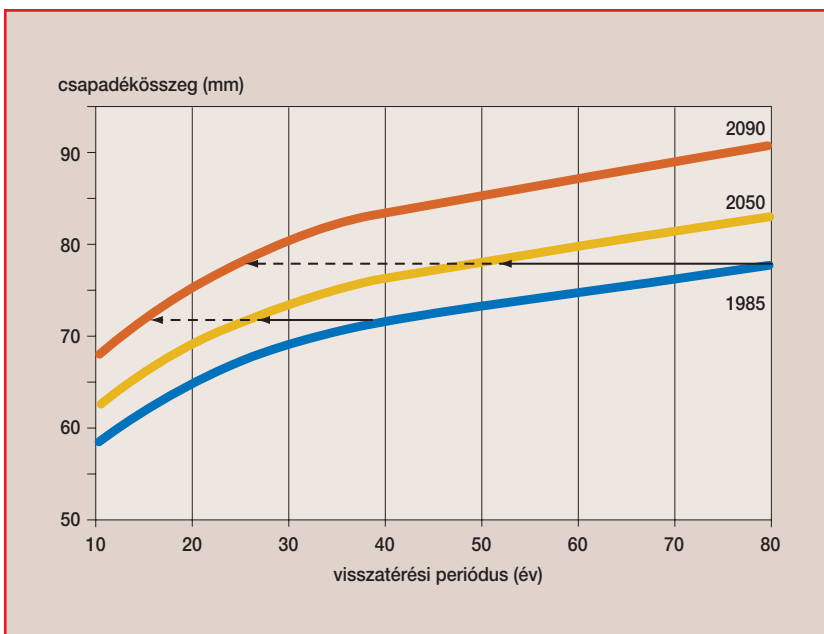




18. ábra. A nagy csapadékú napok ( $R > 20\text{mm}$ ) számának megváltozása (1976–1999)

Annak ellenére, hogy a 20. században a Kárpát-medence régiójában a lehullott évi csapadék mennyisége fokozatosan csökkent, az extrém csapadékok gyakorisága mégis megnövekedett (18. ábra). Jól emlékezünk még az 1998–2002 közötti időszak heves árvizeire. A Kárpát-medencében valóban nagyoknak számító 20 millimétert meghaladó csapadékú napok száma nagyon jelentősen növekedett az utolsó negyed évszázadban, ami valószínűsíti az extrém csapadékok növekedő gyakoriságát.

A 21. századra vonatkozó modellbecslések szintén a 24 órás extrém csapadékok számottevő gyakoriságnövekedését jelzik, azaz egy-egy szélsőségesen nagy csapadék úgynevezett **visszatérési periódus**ának hossza csökkenni fog (19. ábra).



#### Száraz időszak:

az egymást követő, egy milliméternél kisebb napi csapadékú napok együttese.

#### Visszatérési periódus:

adott éghajlati érték két bekövetkezési ideje között eltelt időtartam. Feltételezzük, hogy a két bekövetkezés között végig csak az adott éghajlati értéket nem meghaladó értékek fordulnak elő.

19. ábra. A 24 órás extrém csapadékok gyakoriságnövekedése (1985–2090). G. A. McBean nyomán, 2003

## A hirtelen klímaváltozás lehetőségei

### Golf-áramlás:

az Atlanti-óceán felszíni ten-  
geráramlása az északi féltekén,  
mely a Mexikói-öbölből indul  
és a Skandináv-félsziget partjai  
mentén elhaladva a sarkkörön  
túl a mélybe süllyed.

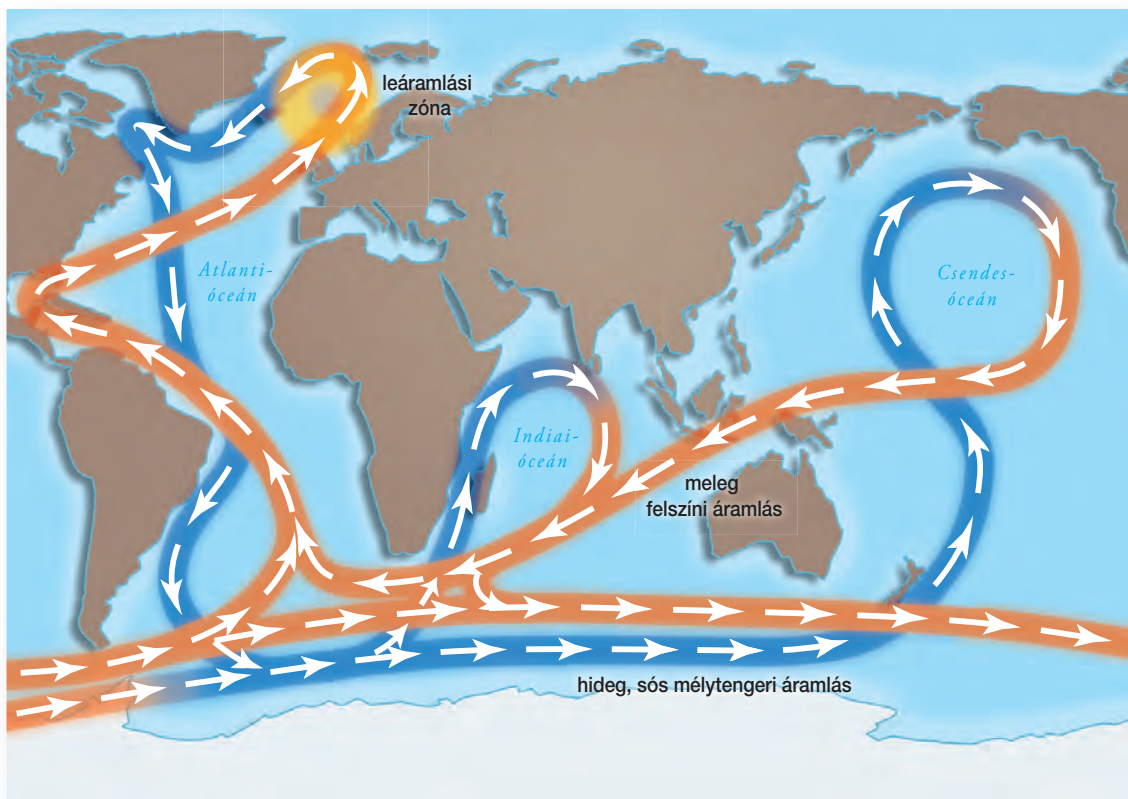
### Termohalin cirkuláció:

a három óceán áramlási rend-  
szere, melyet a sűrűségkülön-  
bségek kiegyenlítődsére törekvé-  
se hajt. A sűrűségbeli külön-  
bségek egyrészt az eltérő hőmér-  
sékletű, másrészt az eltérő só-  
tartalmú vizek között alakul-  
nak ki.

A földtörténet során már többször is volt arra példa, hogy a Föld nagyobb régiójában gyors lefolyású éghajlatváltozás következett be. A pleisztocén kor legutolsó eljegesedési periódusa becslések szerint 100 000–110 000 éven át tartott. Ennek végén – a melegedési periódust megszakítva – ékelődött be a felső-dryas hideg időszak, melynek hossza megközelítően 1100–1300 év volt. A felső-dryas egy nagyon hirtelen melegedéssel fejeződött be, grönlandi jégfuratminták alapján ennek mértéke meghaladta az évtizedenkénti 5 °C-ot. A tudósok feltevése a felső-dryas kialakulásáról az, hogy az interglaciális melegedés során Észak-Amerika hirtelen olvadó jég-takarója leállította a **Golf-áramlást**, ami jelentős lehűlést okozott az észak-atlanti térségben. Ennek éghajlati következményeit Euráziában számos helyen megtalálták (a skandináv tűlevelű erdőket tundrák váltották fel, a magashegységekben intenzív hófelhalmozódás és gleccserképződés jelentkezett).

Van-e esély napjainkban a Mexikói-öbölből induló s az Atlanti-óceánt átszelő Golf-áram gyors leállítására? A Golf-áram délnyugatias hőszállítása egyértelműen melegíti (5–7 °C-kal) az észak-atlanti térséget, s vele együtt Európát is. A világóceán mélytengeri és felszíni áramlásainak rendszere, az úgynevezett óceáni szállítószalag (20. ábra) egyedüli jelentős leáramlási zó-

20. ábra. Az óceáni szállítószalag

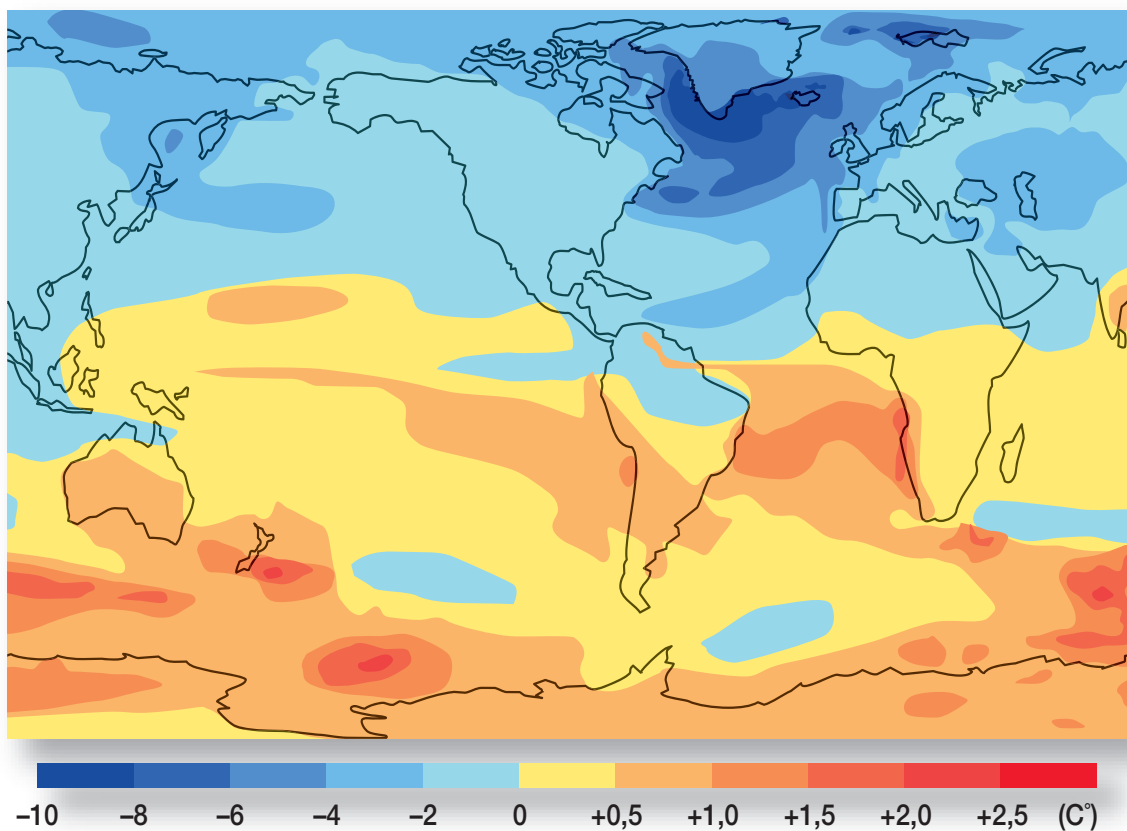


nája az Atlanti-óceán északi részén található. Az áramlás jellege elsődlegesen **termohalin**, ami azt jelenti, hogy a hőmérsékleti (termo) és a sótartalmi (halin) különbségek kiegyenlítődére irányul. A hidegebb és nagyobb sókoncentrációjú, sűrűbb víz lesüllyed az észak-atlanti térségben. A globális melegedés következtében jelentős mértékben olvadó sarki jég csökkentheti a leáramlás mennyiségét és intenzitását az olvadó jég alacsony sótartalma miatt, ami elméletileg legvégső esetben akár az áramlás leállításához is vezethet. Az elmúlt három évtizedben kimutatható egy kismértékű s ellenkező előjelű sótartalom-változás a trópusi vizekben és az észak-atlanti térségben.

Valóra válhat-e az úgynevezett Pentagon-jelentésben (2004. március) szereplő hirtelen éghajlatváltozás vagy akár a *Holnapután* című filmben megjelenített drámai klímaváltozás?

Sem a jelentés, sem a film nem adja tudományos közelítését a problémának. A sajtó félreértette, netán szándékosan félremagyarázta a jelentés megállapításait. A jelentés készítői nem meteorológusok, hanem biztonsági szakemberek, s feladatuk a lehetséges legszélsőségesebb forgatókönyv, s nem a reális jövőkép bemutatása volt. A tanulmány azt állítja, hogy a globális melegedés miatt megváltozhat az óceáni cirkuláció, s a Golf-áramlás hirtelen leállhat. Ennek következtében az európai és az észak-amerikai kontinens erősen lehűl. Bár ezen események bekövetkeztének minimális esélye van, mindazonáltal mégsem mondhatjuk, hogy teljességgel lehetetlen.

21. ábra. A hőmérséklet megváltozása az óceáni cirkuláció felbomlása után





*A természeti környezetszennyezés ellen semmit se tudunk tenni, de az általunk okozott kár tudatosan csökkenthető*



Az észak-atlanti térség óceáni vízáramlás-erősségének szimulációi azt mutatják, hogy a modellek egy hányada a 21. század második felétől már a vízáram jelentős csökkenését prognosztizálja. De az is egyértelmű, hogy a 21. század végéig egyik modell sem feltételezi a Golf-áram leállását. (Ez a tény természetesen adódhat a modell fizikai korlátaiból is.) Más és más kiinduló állapotokból indítva a modellezést, s feltételezve az óceáni szállítószalag felbomlását a 21. ábra térképe az erre az esetre becsült globális hőmérsékletváltozást jelzi. Az északi féltekén egyértelmű hűlés (észak-atlanti maximumértékekkel), a déli féltekén egyértelmű melegedés várható. A globális melegedés epizódjaként bekövetkező időszakos lehűlést követően évek, esetleg évtizedek telhetnek el, míg az óceáni áramlás átrendeződve újraindul. Ezután a globális melegedés tovább folytatódik mindaddig, míg az antropogén eredetű üvegházgáz-kibocsátás le nem csökken. Az ilyen típusú éghajlati eseményeknek az esélye azonban hihetetlenül kicsi, és semmiképpen sem egyik napról a másikra következik be.

Végezetül tegyük fel a kérdést: mi lehet a társadalom, a politikusok részéről a megfelelő stratégia? Alkalmazkodni a változásokhoz vagy megpróbálni csökkenteni az üvegházhatású gázok kibocsátását? Az önkorlátozás kívánatos, de nem elég hatásos. Egy-egy ország központi erőfeszítései jelentős eredményeket hozhatnak ugyan, de mindenképpen szükség van a kibocsátást erősen korlátozó nemzetközi egyezményekre és ezek betartására. Ezzel együtt alkalmazkodnunk kell a változásokhoz, melyekre mindenképp fel kell készülnünk, hiszen az üvegházgázok légköri tartózkodási ideje meglehetősen nagy, s ezért a kisebb koncentrációértékekre való visszatérés időben nagyon elhúzódik.

## Ajánlott irodalom

- Bradley, Raymond S.*: Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary. San Diego: Academic Press, 1985.
- Czelnai Rudolf*: A világóceán – Modern fizikai oceanográfia. Bp.: Vince K., 1999.
- Dunkel Zoltán* (szerk.): Az éghajlatváltozás és következményei. Bp.: Országos Meteorológiai Szolgálat, 1998.
- Glantz, Michael H. – Katz, Richard W. – Nicholls, Neville* (eds.): Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- Graedel, Thomas E. – Crutzen, Paul J.*: Atmospheric Change: An Earth System Perspective. New York: W. H. Freeman, 1993.
- Hunkár Márta – Mika János* (szerk.): Időjárási és éghajlati szélsőségek. Bp.: Országos Meteorológiai Szolgálat, 1999.
- Karátson Dávid* (szerk.): Pannon Enciklopédia – Magyarország földje. Bp.: Kertek 2000, 1997.
- Lamb, Hubert H.*: Climate, History and the Modern World. London: Rutledge, 1982.
- Mersich Iván – Práger Tamás – Ambrózy Pál – Hunkár Márta – Dunkel Zoltán* (szerk.): Magyarország éghajlati atlasza. Bp.: Országos Meteorológiai Szolgálat, 2002.
- Nánási Irén* (szerk.): Humánökológia: A természetvédelem, a környezetvédelem és az embervédelem tudományos alapjai és módszerei. Bp.: Medicina, 1999.
- Pálvölgyi Tamás*: Az új évezred környezeti kihívása: az éghajlatváltozás. Bp.: L'Harmattan, 2000.
- Saltzman, Barry*: Dynamical Paleoclimatology: Generalized Theory of the Global Climate Change. San Diego: Academic Press, 2002.
- Siedler, Gerold – Church, John – Gould, John*: Ocean Circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean. San Diego: Academic Press, 2001.
- Trenberth, Kevin E.* (ed.): Climate System Modeling. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- von Storch, Hans – Zwiers, Francis W.*: Statistical Analysis in Climate Research. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.



